

# DEM 在爆炸载荷下混凝土坝体响应的应用

鲁晓兵 郭易圆 李世海

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 对将离散元方法(DEM)用于混凝土坝在爆炸载荷作用下的响应进行了探讨。编制的离散元程序可以对三维坝体沿任意方向划分块体,并对炸药所在位置的块体进行了特殊处理。通过数值结果与现场实验结果的对比表明,DEM 用于爆炸载荷下混凝土坝体的动态分析是可行的,数值计算结果的精度与划分的快体的尺度以及材料参数如阻尼系数等密切相关。块体尺度越小,阻尼系数、本构参数越接近实际材料,结果越符合实际。

**关键词** 爆炸载荷,振动,混凝土坝

## THE APPLICATION OF DEM ON THE CONCRETE DAMS UNDER BLAST LOAD

Lu Xiaobing Guo Yiyuan Li Shihai

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

**Abstract** The study on the application of DEM on the concrete dams under blast loading is processed. The program may divided the dam into assemblies of blocks in any directions, and a special method is used in treating of the block that the detonation is set. It is shown that DEM may be used in the analysis of concrete dams under blast load by the numerical and experimental data. The smaller the size of the blocks, the smaller the differences between the damp and coefficients of constitutive relation adopted and real material, the more correct the numerical results.

**Key words** Blast load, vibration, concrete dam

## 1 前言

混凝土坝已被广泛地应用于水利工程中,有些坝体使用期满后将被拆除,目前看来,通过爆炸的方法来拆除,是比较经济的做法。但是对爆炸载荷下坝体的动态响应还不太清楚。离散单元方法由 Cundall<sup>[1]</sup>提出,先后用于隧道、边坡等的稳定性分析,但主要是用于静态情况。本文将探讨离散单元方法(DEM)分析爆炸载荷下坝体的动态响应的可行性。

在本文中,编制的离散元程序可以对三维坝体沿任意方向划分块体,并对炸药所在位置的块体进行了特殊处理,采用的面面接触刚体六面体单元。

## 2 面面接触动态离散元方法简介<sup>[2,3]</sup>

(1)基本方程。该方法将结构视为通过弹簧联结的刚体六面体单元的集合。每个接触点可以承受压力和剪力。每个面有四个接触点与邻近块体联结。设材料满足 Mohr-Coulumb 准则且不能受拉。

每个块体质心的运动可由牛顿第二定律确定,即:

$$M\ddot{U}_i + C\dot{U}_i + KU_i = \sum_{j=1}^{24} F_{ij} \quad (1)$$

$$F_{ij} = k_i \Delta U_{ij} \quad (2)$$

$$K = \sum k_i \quad (3)$$

式中: $M$  是块体的质量;  $U$  块体质心的位移或转角;  $F$  是总力或总力矩;  $C$  是阻尼系数;  $k_i$  是块体  $i$  接触点的等效刚度;  $\Delta U_{ij}$  是块体  $i$  上  $j$  接触点与其邻近接触点的位移差。

(2)力和位移之间的关系。接触点上的接触力包括法向压力和剪力,它们与位移之间的关系如下:

$$\Delta F_n = k_n \Delta u_n, \Delta F_s = k_s \Delta u_s \quad (4)$$

式中: $\Delta u_n, \Delta u_s$  分别为法向和切向位移增量。且压和剪的强度满足如下条件:

如果  $F_n \leq 0$ , 则两接触点分开。

如果  $F_s = C + F_n \tan \varphi$  两接触点之间将产生滑移。

## 3 爆炸产生的气体的本构关系

假设爆炸后将立即产生高压气体且没有热消散,该高压

气体将挤压其周围的块体，气体体积将增大而压力将减小。于是将气体取如下的本构关系：

$$PV^{\gamma_1} = P_0 V_0^{\gamma_1} \quad P \geq P_k \quad (5)$$

$$PV^{\gamma_2} = P_k V_k^{\gamma_2} \quad P < P_k \quad (6)$$

式中： $\gamma_1, \gamma_2$  为参数且分别为  $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 4/3$ ； $P, V$  是气体的压力和体积； $P_0, V_0$  是气体的初始压力和体积； $P_k, V_k$  是气体的临界压力和体积。 $P_k$  由下式确定：

$$P_k = P_0 \left[ \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_1 - \gamma_2} \left( \frac{(\gamma_1 - 1) Q_w}{P_0 V} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\gamma_1 - 1}} \quad (7)$$

式中： $Q_w$  是由爆炸产生的总热量。 $P_0$  由下式确定：

$$P_0 = \frac{\rho_w D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (8)$$

式中：炸药的密度  $\rho_w$  取为  $1000 \text{ kg/m}^3$ ，爆速  $D$  取为  $4000 \text{ m/s}$ 。

#### 4 方程的求解

方程用动态松弛法求解，该方法是一种显示差分而且假设每一时步一个块体只与邻近的块体产生影响。故每个块体可以单独求解。方程的离散格式如下：

$$m_i (\ddot{u}_i^t - \dot{u}_i^{t-\Delta t}) = \Delta t \{ (F_i^{\text{ext}})^t - (F_i^{\text{int}})^t - c_i \dot{u}_i^{t-\Delta t} \} \quad (9)$$

$$\Delta u_i^t = \dot{u}_i^t \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中： $i$  表示  $i$  块体； $\dot{u}_i, u_i$  分别为速度和位移； $m_i$  是块体  $i$  的质量； $\Delta t$  是时间步长； $F^{\text{ext}}$  作用在块体  $i$  上的力； $F^{\text{int}}$  是作用在块体  $i$  上的接触力。

(1) 药所在块体运动分析的处理。将炸药所在块体分成 24 小块体，每个小块体只有一个接触点与邻近的块体相连，小块体的运动方程由下式确定：

$$(u_i)^t = \frac{1}{m_i} [(F_i^b)^t - (F_i^{\text{in}})^t - c_i(u_i)^{t-\Delta t}] \quad (11)$$

式中： $i$  代表  $i$  小块体； $u_i, \dot{u}_i, u_i$  分别是加速度、速度和位移； $m_i$  是块体的质量； $F_i^b$  是时间  $t$  由爆炸产生的力； $F_i^{\text{in}}$  是接触力； $c_i$  是阻尼系数。

(2) 数值和实验结果的比较。为了比较程序和方法的可靠性，在本节进行了数值和实验结果的对比。实验是在某混凝土围堰做的现场实验，坝体的横截面由图 1 给出，坝体表面垂向速度随时间和距炸药点距离的衰减的对比由图 3 给出。坝体材料的弹性模量和泊松比为  $E = 5.9 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0.2$ ，药量为  $6 \text{ kg}$ 。

爆炸产生的载荷如图 2 所示，显然，该载荷是一典型的冲击波。其他的计算参数取如下值：密度  $2400 \text{ kg/m}^3$ ，坝高  $17 \text{ m}$ ，轴向长  $170 \text{ m}$ ，顶宽  $4 \text{ m}$ ，坝坡比  $1:0.75$ ，炸药的位置在： $x$

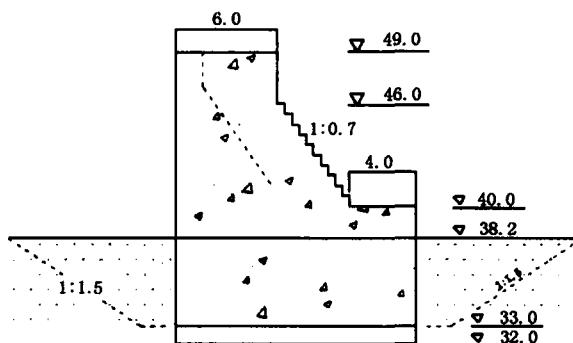


图 1 坝体横截面示意

$= 85 \text{ m}$ ,  $y = 3 \text{ m}$ ,  $z = 8 \text{ m}$ , 初始处于静力平衡状态，坝体与岩体接触面为法向固支，其他面为自由面，爆炸产生的初始压力为  $p_0 = 1/8 \rho D^2$ ，其中  $\rho$  是密度， $D$  是炸药的爆速。坝体的阻尼系数取为  $0.03$ ，弹性模量  $5.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，泊松比  $0.2$ ，每个块体  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。

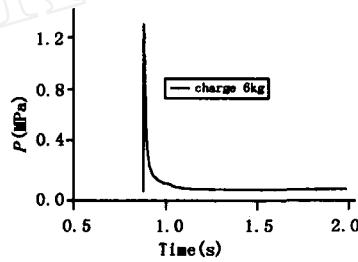


图 2 爆炸产生的压力曲线

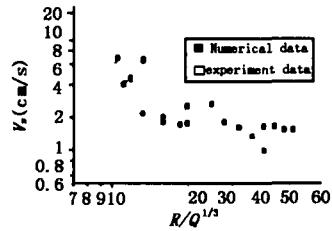
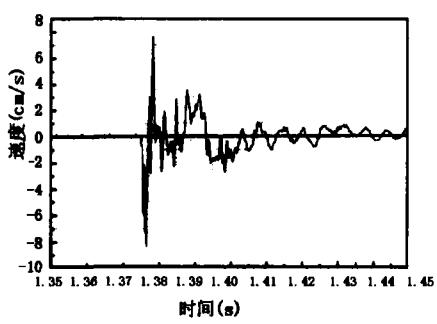
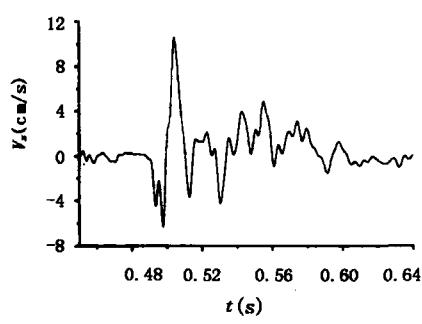


图 3 垂向振动速度随距离衰减的对比

坝体表面垂向振动速度随距离衰减的数值模拟结果与实验结果的对比如图 3 所示，垂向振动速度随时间衰减结果的对比结果如图 4 所示。结果表明，数值模拟结果与实验结果之间是比较接近的。计算结果中的起始时间是静力计算结束时的时间，约  $1.37 \text{ s}$ 。



(a) 21.5m 处的实验结果



(b) 24m 处的计算结果

(3) 块体尺度的影响。从图 5 可以看出, 块体尺寸明显地影响数值模拟结果, 块体尺寸越大, 振动速度越小且衰减越快, 因为此时块体质量越大, 阻尼也越大。

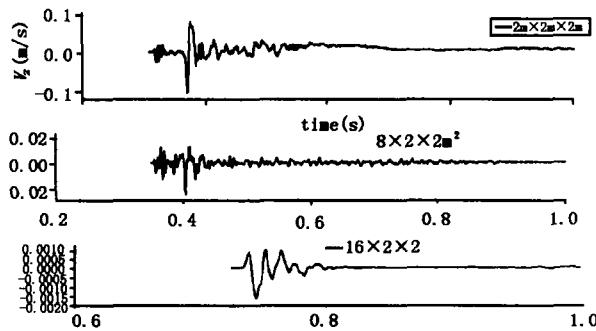


图 5 块体尺度的影响

## 5 结语

对面面接触三维离散元方法进行了改进。从坝体垂向振动速度随时间和距离衰减的数值模拟结果和实验结果对

比看到, 改进后的离散元方法应用于爆炸载荷下混凝土坝的响应分析是可行的。同时也讨论了块体尺度对计算结果的影响。

作者简介 鲁晓兵, 1968 年生。现在中国科学院力学所从事岩石力学方面的工作。

## 参 考 文 献

- 1 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, 1(29): 47 ~ 65
- 2 郭易元, 李世海, 柳春图. 三维离散元在爆炸载荷下岩土工程中的应用. 爆炸, 2000, 17(增刊): 19 ~ 23
- 3 王泳嘉, 邢继波. 离散单元法及其在岩土工程中的应用. 沈阳: 东北大学出版社, 1991
- 4 丁汉莹, 方正, 李世海, 等. RCC 爆炸可行性实验研究. 中国科学院力学研究所报告, 2001, 3
- 5 李世海, 陈力, 方正. RCC 翻转的实验研究. 中国科学院力学研究所报告, 2001, 3